

文章编号: 1000 0585(2002)02-0155-08

基于 GIS 的细胞自动机模型与 人地关系的复杂性探讨

刘继生¹, 陈彦光²

(1. 东北师范大学地理系, 长春 130024; 2. 北京大学城市与环境学系, 北京 100871)

摘要: 探讨人地非线性关系可以揭示地理系统空间复杂性的许多简单本质, 具有重要的理论意义和实践价值。以地理信息系统 (GIS) 为技术支持, 建立以细胞自动机 (CA) 为核心的综合集成模型, 将成为人地关系复杂性研究的主要方向。建议在 CA-GIS 集成技术的基础上, 一方面引入人工神经网络、进化算法、多重智能体系 (MAS) 以及后现代数学分析方法, 另一方面面向具体研究对象开发包括自然、人文地理要素在内的集成区域动力学模型, 据此发展智能化综合集成模型体系, 形成人地关系复杂性的模拟研究实验室。本文提出了开发智能化 CA-GIS 模拟方法的初步设想。

关键词: 人地关系; 空间复杂性; 细胞自动机; 分形理论; 人工神经网络; GIS

中图分类号: P208; N945.12; X24 **文献标识码:** A

1 前言

人地关系问题不仅是人文地理学的研究核心, 也是整个地理学的核心问题。早在 19 世纪前期, K. Litter 在其《地学通论》一书中就曾指出: “自然的一切现象和形态对人类的关系乃是地理学的中心原理”^[1]。遗憾的是, 在人地关系的机制和本质尚未澄清的情况下, 学者们过早地陷入了没完没了而又纠缠不清的哲学争论, 以致人地关系问题因涉嫌“环境决定论”乃至株连于地缘政治学而在许多国家受到意识形态的消极影响。

二战以后, 随着所谓后工业化时代的到来, 人们突然感到地理学的理论现状与现实世界问题严重脱节: 一方面, 地理学的人地关系理论发展步履蹒跚; 另一方面, 环境问题日益恶化, 人地关系日趋紧张, 以致整个现代文明的地理基础面临严重的生态威胁。当地理学家终于重新认识到人地关系问题的确是地理科学的中心课题的时候, 却又感到有关研究经验积累不足和研究手段与方法的极端匮乏。今天, 形势已非常明确: 地理学家要想在人与环境问题上有所作为而不仅仅当一个事后诸葛亮, 那就不能停留于经验探讨, 而必须进行理论建设; 不仅要建设人地关系理论, 而且必须发展一套解决现实地理问题的技术模式: “目前的关键是找到一种技术模式使人地关系论变成一种科学理论。” (黄秉维)^[2] 唯其如此, 理论和实际才能有效地联系起来。

收稿日期: 2001-07-25; 修订日期: 2001-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49771035)

作者简介: 刘继生 (1955), 男, 吉林省东丰县人, 东北师范大学地理系教授, 博士。主要从事地理分形和地理系统的空间复杂性研究, 发表学术论文 60 余篇。

幸运的是, 发展上述技术模式的条件已逐渐成熟。我们认为, 基于地理信息系统 (GIS) 的细胞自动机 (Cellular Automata, CA) 模拟方法可以成为研究人地关系的技术核心之一。人地关系研究的困难在于复杂性 (complexity) 难于处理, CA 在探索地理系统的空间复杂性方面有独到的功能, 如果将 CA 与 GIS 技术有效沟通, 将能解决人与环境相互作用的许多难题。

2 人地关系与空间复杂性

2.1 复杂性科学与 CA 理论

“探索复杂性”原本是西方一些具有远见卓识的学者为探讨 21 世纪的科学发展方向而于 80 年代打出的一种科研旗帜^[3~5], 并逐渐形成一股学术思潮。由于研究的角度和方法不同, 在复杂性科学旗帜下又分出若干流派, 其中影响最大、与当代地理学关系最深的是美国的圣·菲研究所 (Santa Fe Institute, SFI) 的学术思想和研究方法。

SFI 学派的主要特色之一是重视仿生科学。人类在处理现实问题的时候, 几乎每时每刻都涉及到各种计算, 但人类对于复杂现象的计算问题却每每束手无策——传统数学对于绝大多数非线性方程迄未找到一般的解决方案。另一方面, 人们发现, 生命的演化过程在本质上也是一种计算^[5], 而生物进化在解决复杂计算问题方面时常比人类的计算方法要高明而且有效得多。于是, 从 40 年代以后, 一些杰出的科学家如 von Neumann 等便开始摹拟生命演化、生理变化或生物进化创建新的科学理论。随着计算机技术、后现代数学 (分形、混沌等) 等相关学科的发展, 仿生科学理论积涓成流, 于 80 年代后形成气候, 终于崛起了一批新兴的科学群体, 包括 von Neumann、Ulam 等开创的细胞自动机理论^[6], McCulloch、Pitts 等开创的人工神经网络 (Artificial Neural Network) 理论^[7], Holland 等发展的基因算法 (Genetic Algorithms, GA, 或译“遗传算法”) 理论^[8], 以及 Longton 等发展的人工生命 (Artificial Life, A-life) 理论等, 加上人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 理论, 构成了丰盛的仿生科学体系。CA、GA 和神经网络理论在国外先后被引入地理科学研究, 其中尤以 CA 理论的地理应用为盛^[10], 发展前景也最为明朗, 目前, 国内地理学界也开展了有关研究。^[11,12]

2.2 人地关系的复杂性问题

虽然至今为止还没有给复杂性下一个严格的定义, 但当复杂问题出现的时候, 人们一般都能识别: 只要一个系统是由多要素相互作用构成的动态、开放的多层次网络, 就肯定具有复杂性质。人地关系简而言之乃是人文地理系统与自然地理环境的相互作用形式, 其复杂程度可想而知, 以下几个方面就能说明许多问题: (1) 没有明确的时空边界。一个时期的人地关系特征, 是历史上人地相关活动的某种函数; 一个地区的人地关系是影响另一地区人地关系的部分原因, 同时也是其他地区人地关系的某种结果。(2) 多重反馈、互为因果。人类与环境的相互作用构成了许多反馈环路, 致使各种现象互为因果。如果考虑到人类社会系统和自然环境系统中各自的反馈网络, 关系就更为错综复杂。(3) 要素众多, 变化莫测。任何一个地理区域如果逐层细分, 涉及的要素数目均可达于无穷而无法备记, 任何一个要素的行为对环境条件都非常敏感, 其变化不可预测。“蝴蝶效应”虽然是 Lorenz 的一个比喻, 但却反映了地理系统要素关联的敏感性性质。

所有的复杂性问题都可以归结为处理问题时的计算复杂性, 而计算复杂性问题又可以

归结为时空容量问题, 即存储数据需要的空间大小以及计算求解过程的时间长短。要想精确分析一个区域的人地关系, 首先要具备该区域的精细空间数据, 目前还没有足够精密的仪器用以提取每个地理要素的时空与状态数据, 也没有足够的系统存储空间存储超级海量数据, 并且对数据处理需要很长的时间。在人地关系中许多计算问题非常复杂, 即便处理极小区域的人地相关问题, 各种复杂性定律——对初始条件的敏感依赖性, 不可计算性, NP—完备性, 诸如此类——也会接踵而至, 更不用说大区域乃至全球问题了。

由于上述原因, 人地关系研究必须另辟蹊径, 寻找仿生计算方法便是一条重要的思路。我们现在已经知道, 复杂性不见于个体水平, 而是以相互关联的模式出现于以一定时空视角可以观察得到的更大场景之中。复杂性理论表明, 局部的行为可以导致整体的秩序, 整体的秩序又左右着局部的行为, 这暗示着, 对于复杂系统的探讨, 各个组成部分的细节是无关紧要的; 复杂性理论还表明, 简单的规则可以导致复杂的结构, 复杂的系统隐含着一些简单的规则。按照上述思想, 人地关系研究不必具备精细的时空数据, 但要借助有效的模拟计算方法。基于 GIS 的 CA 模型就是探索人地系统空间杂性的技术关键。

3 基于 CIS 的 CA 模型和人地关系的模拟实验方法构想

3.1 CA 模型与 CA-GIS 集成系统

利用 CA-GIS 集成系统探讨人地关系问题将是未来地理研究的重要方向。所谓 CA, 实际上是一种布尔化的离散动力系统: “CA 可被理解为非常简单的动态空间系统, 在该系统中, 每一个阵列 (array) 中的细胞状态, 按照一定的状态转化规则, 依赖于与该细胞构成一定邻位关系的其他细胞的先前状态。”^[13] 一个标准的 CA 模型有四个基本构成要素: 细胞、状态集、邻位的定义和状态转化规则。根据 Zeigler 和 Couclelis 的观点^[14, 15], CA 乃是序列器 (sequential machine) 的一种特例, 一个 CA 实则一个结构如下的自动序列器: (C, P, N_i, δ) , 这里 C 是细胞 C_i 的集合, P 是局域状态的变程集, N_i 是第 i 个细胞的邻位集, $\delta: P^{|N_i|} \rightarrow P$ 是局域状态迁移函数。

CA 作为一种动力学模型可用于处理大批的变量, 每个变量可被表作细胞的一种状态, 其离散式的数值演化由它与其他细胞的局域相互作用决定^[16]。CA 具有非常强的模拟计算能力, 已被证明与图灵机 (Turing Machine, TM) 等价^[17], 这意味着 CA 作为一种数学模型具有最高的计算能力: 只要给出适当的初始条件, 就能模拟任何数字计算机。

然而, 单纯的 CA 用于地理模拟却有两大缺陷, 其一是它们模拟的只是一种“可能的世界 (possible world)”, 而非现实的世界^[18]: 它模拟的植被的确像植被, 但既非大兴安岭的植被, 亦非横断山区的植被; 它模拟的城市的确像城市, 但既非北京, 亦非上海, 也非长春……。模拟可能的地理世界, 肯定具有极大的理论意义, 因为可以据之揭示地理系统的某些演化机制, 但却没有直接的实践价值, 我们既不能据之解释一个现实地理系统的形成与演化, 更不能据之进行发展预测和预报。第二个缺陷是只能据之模拟比较单纯的地理系统, 对于复合的地理系统特别是人地关系问题难以奏效。

解决上述难题的有效途径是将 CA 与 GIS 技术结合起来, 集成新的 CA-GIS 模型。CA 与 GIS 的姻缘可谓是天作之合。GIS 作为“处理空间数据的数值计算系统”^[19], 是目前地理信息分析的重要工具, 但却存在一系列的技术缺陷, 其中明显的有如下三个方面^[19]: 其一是对许多算子 (operators) 的执行性能较差, 其二是处理动态空间数据的能力较弱,

其三是处理时间维度 (temporal dimension) 的功能不强。GIS 所短缺的功能 CA 大多具备或者将能具备: 在处理空间动态数据和时间维度方面现已不成问题, 经过适当的硬件扩充, CA 可以成为空间分析算子。由于基于光栅 (raster) 的 GIS 的数据结构与建设 CA 模型的晶格 (lattice) 构造都是一种网络 (grid) 结构即二维空间阵列, GIS 的像素与 CA 的细胞可以表作相同的形式, 这是二者结合的先决条件。

集成 CA 与 GIS 模型的方法目前主要有三种技术思路: 其一是软件思路, 主要是借助一定的算法语言和编译程序, 当前人们采用的主要是这种方法。White 和 Engelen 是最早倡导借助 CA-GIS 集成模型模拟空间复杂性的部分学者^[20], 他们利用基于 GIS 的 CA 模型成功地模拟了美国亚特兰大 (Atlanta) 等城市土地利用的分形演化图式^[21]。诸如此类的模拟现已不断增多。

其二是硬件思路, 将有关软件固化到电子设备上, 制成细胞自动器 (cellular automata machines, CAMs)^[22], 将 CAMs 安插在 GIS 中计算机的主板上即可实现 CA-GIS 的集成。Wagner 等人积极提倡这种方法^[19]。借助 CAMs 不仅可以集成 CA-GIS, 而且可以扩充 GIS 的算子执行能力: 通过 GIS 的特定函数代表 CA 模型的状态迁移规则, 可以使 CA 充当 GIS 的空间分析算子。

其三是数学思路, 即利用一种新的地图代数——地理代数学 (geographical algebra)^[23]。GIS 处理不同图层的数据、进行数据覆盖或在不同图层的同一像素 (或细胞, 即代表同一地理要素的基元) 上执行基于地图的各种操作都要利用地图代数, 如果能将 CA 的状态转化规则视为一种地图代数, 则可以将二者有机地结合起来。Couclelis 等基于一种新的地理哲学思想提倡这一数理方法^[24, 25], 但地理代数学尚在发展之中。

上述三种方法各有短、长。利用软件集成 CA-GIS 模型相对而言简便易行, 在处理现实数据、进行地理系统的信息分析和定性预报方面行之有效。但是, 这种方法存在一种令人忧虑的问题, 那就是: Ulam、von Neumann 等当初发展 CA 理论的初衷是想利用一组简单的规则模拟复杂的系统, 从而将复杂的结构解释为简单的规则; 但是, 人们在利用软件集成 CA-GIS 的过程中, 由于技术原因不得不再放宽 CA 模型的假设条件, 致使 CA 的定义逐步松弛, 从而失去了原初 CA 框架的完整性, 地理 CA 不仅日益复杂, 模拟执行困难, 而且难于理解^[25]; 再者学者们在借助 CA 研究地理现象时, 大多追求的是模拟结果与研究对象的数字化地图的一种“简并”性质, 在制定状态转化规则时比较随意——如果地理系统的因果关系可以一一对应, 这种方法倒是无可厚非, 但事实上我们面临的是一因多果、一果多因的非线性地理系统, 在这种情况下, 随意地松弛 CA 的假设就会导致模拟分析的自欺欺人^[10]。将 CAMs 作为 GIS 的分析引擎, 其优越性比较明显, 扩充 GIS 的算子执行能力即其优点之一^[19]。但硬件思路是以软件思路为基本条件的, 因此必然沿袭了软件方法的一些缺陷。如果 CA 的假设和定义被任意放宽以致没有严格的章法, 地理 CA 研究必将丧失其理论意义和实践价值。计量运动期间一些学者为了某种预期的结果而滥用模型、臆设参数, 是最终导致地理学数量化进程严重受挫的主要原因之一。我们认为, 数学思路是未来 CA-GIS 集成的主要技术思路, 在此基础上开发软件、创制硬件才会不失 CA 模型的优良本色。

3.2 智能化人地关系模拟系统的初步构想

利用 CA-GIS 集成模型模拟人地关系的技术思路并不复杂: 借助 CA 模型表示某种人

文地理系统如城市——细胞的状态代表城市的形态, 转化规则代表城市形态作为邻位关系和内在适宜性的某种函数的可能变化; 借助 GIS 数据生成变化较缓的自然环境如河流——可用数字高程模型 (DEM) 代表地表形态, 如此等等。通过 CA 与 GIS 系统环境的相互作用即可揭示人地相关过程如自然因素作用下的城市化进程。White 与 Engelen 等在研究美国辛辛那提 (Cincinnati) 城市土地利用演化的分形图式时, 综合地考察了地形 (山岭、河流等)、交通格局 (公路、铁路等) 与土地形态的相互作用, 得出了地形主要是通过交通形势影响土地利用形态的分析结论^[13]。

自从 CA-GIS 集成模型发展以后, 人地关系问题已有机地融入各项地理研究之中, 不必限于专门的人地关系探讨。White 与 Engelen 等提出的一个区域空间动力学集成模型^[26]对我们从新的角度探索人地关系复杂性问题很有启发意义。作为联合国环境计划 (UNEP) 项目的一部分, 他们对加勒比海圣卢西亚 (St Lucia) 岛的土地利用演化图式进行了模拟分析, 旨在揭示全球气候变化条件下该岛上可能出现的社会经济后果。为此研究目标他们创建了一个综合性集成模型, 该模型包括三大组成部分: (1) GIS, 用以储存有关的空间数据, 包括土地利用方面的空间数据和反映各类土地利用适宜性的数据。(2) CA, 即微观尺度的空间细胞模型, 这是一个定义于非均质网络空间上的约束型随机细胞自动机, 用以表征系统内在的局域空间动力学, 细胞状态代表土地利用或覆盖。(3) 集成动力学模型, 即宏观尺度的非空间模型, 表征人口、经济和有关自然环境要素的非局域动力学, 由自然子系统、社会子系统和经济子系统三部分组成。这个综合集成模型中, GIS 是模拟基础, CA 是分析中枢, 宏观尺度的集成动力学模型直接反映人地关系, 但须通过 CA 模型才能将模拟过程动态化和空间化。

White Engelen 模型代表了人地关系研究的一个新的范型, 是 CA-GIS 集成体系处于初创阶段的一个产物, 要想有效地探索人地关系复杂性, 除了像 White Engelen 体系那样面向研究对象构造合理的集成区域动力学模型之外, 我们建议在以下几个方面开展工作。

第一, 分形等后现代数学工具的有效利用。早在 80 年代中期, Wolfram 等就先后证明 CA 可以产生包括分形在内的各种复杂结构^[22, 27], 而地理系统具有广泛的分形构造^[28]; 人地关系过程是一种非线性相互作用过程^[29], 借助 CA-GIS 集成模型模拟人地关系, 必将产生分形等复杂结构, 为此需要借助分形理论等后现代数学方法进行地理信息分析。^[30~32]White 等人的城市土地利用图式的演化模拟, 就曾有效地利用了分形分析方法^[13, 21]。有些学者在讨论 CA 的地理应用时, 喜欢用 CA 之长比较分形等后现代数学方法之短, 然后断言“前者较后者更为优越。”这种比较是没有意义的: 分形等数学方法是一种描述语言, CA 是一种模拟实验工具^[10], 二者既有联系而又彼此性质不同, 在地理研究中只能相辅相成而不能李代桃僵。下一步的工作是, 如何借助算法语言将分形等数学方法编译成分析软件集成于 CA-GIS 模拟体系之中, 并用于地理信息分析。

第二, 人工神经网络和基因算法的引入。为了检查 CA 模型的状态迁移函数及其参量的真确性, 我们需要比较模拟结果与真实系统有关图像的相似性, 此时可以利用人工神经网络进行图式对比分析; 进一步地, 可以利用基因算法设计并训练神经网络的权重, 从而实现 CA、GA 与神经网络在地理模拟中的综合集成。人工神经网络乃是模仿生物神经网络的机理、按照一定规律组建的、对输入模式具有学习和识别能力的数理网络模型, 其学习和运行取决于各种神经元的连接权的动态演化。基因算法连同后来发展的基因 (遗传)

规划乃是仿效生物进化与遗传而设计的一种搜索寻优技术, 它们按照“优胜劣汰”的生存竞争原则, 借助选种、组配、交换、突变等操作使被处理的问题逐步逼近最优解, 故基因算法和遗传规划合称“进化计算”。CA、GA 和神经网络分别在 CA 的迁移规则和神经网络的权重变化等处接口, 将三者综合起来, 可望使 CA-GIS 系统具有一定的学习和进化能力, 从而更加有效地模拟复杂的地理系统。

第三, 多重智能体系的开发。智能体 (agent) 乃是借自人工智能领域的一个时兴概念, 它是为适应广泛的分布式网络计算环境, 借助一定的算法, 对软件设计高度抽象取得的成果。智能体可对数字环境进行感知、识别、判断……, 具有一定的适应性和推理能力, 从而能够按照一定的目标去完成被赋予的某种任务。多重智能体系 (multiagent systems, MAS) 是分布式人工智能的一部分^[33], 该系统的每一位智能个体都是自治的且能复制不同的任务, 这些智能个体通过相互作用和适当的合作就可以构成 MAS。如果在 CA 模型中将细胞封装成具有“自治”能力和面向领域推理行为的智能体, 进而构成 MAS, 则 CA 模型的模拟计算能力将会大为增强, Sanders 等人在借助 MAS 模拟城市化过程的研究中, 在一定程度上考虑了人地关系并涉及分形突现 (emergence)^[28], 尽管模拟者未曾讨论分形。

如果能够做到以上的几个方面, 则 CA-GIS 系统将会具有一定程度的人工智能, 利用这种综合集成系统模拟现实中的人地关系, 不仅可以揭示许多理论规律, 而且可望实现地理环境的演化监测和发展预报。

4 结束语

早在 80 年代末期, 钱学森 (受 Prigogine、Haken 等复杂性探索先驱者的思想和理论的影响) 就建议地理界重视复杂性研究, 并针对“地球表层”提出了“开放复杂巨系统”的概念^[34], 随后又与有关学者合作提出探索复杂性的“从定性到定量综合集成方法”^[35]。钱氏综合集成 (metasynthesis) 概念乃是从西方的综合分析 (meta analysis) 和集成 (integration) 两个概念发展而来^[35]。

现在, 10 多年过去了, 在这 10 几年期间, 西方地理学界在某种意义上正是沿着钱学森等人当年的设想发展至今, 由于种种原因, 我国地理学界对此未予实质上的充分重视。如果说过去不够重视是因为发展前景不够明朗和我们的前沿科学理论准备不足, 那么今天是应该重视的时候了。西方地理学界利用综合集成技术探索空间复杂性, 虽然大多涉及人地关系, 但未直接针对人地关系进行深入的研究, 如果我国学者能在此领域做一些工作, 将能够发挥我们地理学研究的某些比较优势。

最后强调一点, 在看待 CA 模型方面, 本文作者赞同 Couclelis 女士的见解^[25] (可能属于保守的一类), 在没有充分理论依据的前提下, 最好不要对 CA 假设任意放宽, 松弛的 CA 模型构造起来虽然方便, 但模拟结果的分析却困难许多。描述复杂现象最有效的办法固然是复杂性的本身, 但创制复杂性模式的规则必须简明, 我们的目标是要揭示复杂系统背后的简单本质, 而不是以一种复杂结构替代另一种复杂结构。只有利用简单的规则模拟地理系统的复杂结构, 才能将人地非线性相关过程还原为简明的地理规则。

参考文献:

- [1] 李振泉. 人地关系论. 中国大百科全书·地理学: 人文地理学. 北京: 中国大百科全书出版社, 1984. 12~ 14.
- [2] 王义民, 王荣珍, 靳军. 人地关系的哲学思考. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2000, 13(2): 200~ 203.
- [3] Nicolis G, Prigogine I. Exploring Complexity: An Introduction. New York: W. H. Freeman, 1989.
- [4] Stein D L(Ed.). Lectures in the Sciences of Complexity: Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity(Vol. 1). Reading, MA: Addison Wesley, 1989.
- [5] Waldrop M M. Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos. New York: Simon and Schuster, 1992.
- [6] Burks A W(Ed.). Essays on Cellular Automata. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1970.
- [7] McCulloch W S, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943.
- [8] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan, 1975.
- [9] Longtin C. Studying artificial life with cellular automata. Physica D, 1986, 22: 120~ 149.
- [10] 陈彦光, 周一星. 细胞自动机与城市系统的空间复杂性模拟: 历史、现状与前景. 经济地理, 2000, 20(3): 35~ 39.
- [11] 黎夏, 叶嘉安. 约束性单元自动演化 CA 模型及可持续城市发展形态的模拟. 地理学报, 1999, 54(4): 289~ 298.
- [12] 黎夏, 叶嘉安. 利用遥感监测和分析珠江三角洲的城市扩张过程—以东莞市为例. 地理研究, 1997, 16(4): 56~ 61.
- [13] White R, Engelen G, Uljee I. The use of constrained cellular automata for high resolution modelling of urban land use dynamics. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 323~ 343.
- [14] Zeigler B P. Theory of Modeling and Simulation. New York: John Wiley, 1976.
- [15] Couclelis H. Cellular worlds: a framework for modelling micro macro dynamics. Environment and Planning A, 1985, 17: 585~ 596.
- [16] Benati S. A cellular automaton for the simulation of competitive location. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 205~ 218.
- [17] Burks A W(Ed.). The Theory of Self Reproducing Automata. Champaign, IL: University of Illinois Press, 1966.
- [18] Batty M, Xie Y. Possible urban automata. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 175~ 192.
- [19] Wagner D F. Cellular automata and geographic information systems. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 219~ 234.
- [20] White R, Engelen G. Cellular dynamics and GIS: modelling spatial complexity. Geographical Systems, 1993, 1: 237~ 253.
- [21] White R, Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land use patterns. Environment and Planning A, 1993, 25: 1175~ 1199.
- [22] Toffoli T, Margolus N. Cellular Automata Machines: A New Environment for Modelling. Cambridge, MA: MIT Press, 1987.
- [23] Takeyama M, Couclelis H. Map dynamics: integrating cellular automata and GIS through geos algebra. International Journal of Geographical Information Systems, 1997, 11: 73~ 91.
- [24] Couclelis H. Requirements for planning relevant GIS: a spatial perspective. Papers in Regional Science, 1991, 70(1): 9~ 19.
- [25] Couclelis H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 165~ 174.
- [26] White R, Engelen G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 235~ 246.
- [27] Wolfram S. Universality and complexity in cellular automata. Physica D, 1984, 10: 1~ 35.
- [28] 陈彦光, 陈文惠. GIS 与地理现象的分形研究. 东北师大学报(自然科学版), 1998, (2): 91~ 96.
- [29] 刘继生, 陈彦光. 人地非线性相关作用的探讨. 地理科学, 1997, 17(3): 224~ 230.
- [30] 刘继生, 陈彦光. 城镇体系等级结构的分形维数及其测算方法. 地理研究, 1998, 17(1): 82~ 89.
- [31] 刘继生, 陈彦光. 城镇体系空间结构的分形维数及其测算方法. 地理研究, 1999, 18(2): 171~ 178.

- [32] 陈彦光, 刘继生. 城市土地利用结构和形态的定量描述: 从信息熵到分数维. 地理研究, 2001, 20(2): 146~ 152.
- [33] Sanders L, Pumain D, Mathian H, *et al.* SIMPOP: a multiagent system for the study of urbanism. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 287~ 305.
- [34] 钱学森. 发展地理学的建议: 在全国第二届天地生相互关系学术讨论会上的发言. 大自然探索, 1987, 6(1): 1~ 5.
- [35] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学的新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志, 1990, 13(1): 3~ 10.

GIS based cellular automata models and researches on spatial complexity of man-land relationship

LIU Ji sheng¹, CHEN Yair guang²

(1. Department of Geography, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2. Department of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: It is of significance to research into nonlinear relationships between human systems and physical environment in order to explore spatial complexity, but it is of difficulty to do so in the past because of lack of effective research means and methodologies. If we develop integrated models including cellular automata(CA) which are based on geographical information system (GIS), we will be able to solve many complex problems on man-land relationship. We suggest that geographers should construct a kind of metasyntactical technical systems being composed of GIS as geographical databases, GIS-based CA models, integrated regional dynamic models, and other related CA-based models. For the sake of making the CA models based on GIS intelligent to certain extent, artificial neural networks, which can be used to distinguish and compare between the simulation patterns and digital maps concerned, and genetic algorithms, and even genetic programming, which can be used to design and train the weights of neural nets, should be adopted into the systems. Going a step further, the multiagent systems (MAS) and the postmodern mathematics of fractal and chaos, the latter of which take the form of softwares by being compiled into some programming, should be comprised in the systems. So geographers will have an artificially intellectualized metasyntactical systems consisting of a number of integrated models based on integrated models which make it easy and convenient to explore spatial complexity on man-land relationship.

Key words: man-land relationship; spatial complexity; cellular automata; fractal theory; artificial neural nets; geographical information system